

PACS 29.40.Gx

ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ С ПОМОЩЬЮ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ

**С.П. Гоков, О.А. Демешко, В.И. Касилов, С.С. Кочетов, Л.А. Махненко,
И.В. Мельницкий, О.А. Шопен**

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
61108, Харьков, Украина*

E-mail: gokov@kipt.kharkov.ua

Поступила в редакцию 16 сентября 2009г

В работе приведены результаты исследования характеристик плоскопараллельной ионизационной камеры, используемой в качестве датчика системы диагностики электронного пучка на радиационном стенде линейного ускорителя электронов ЛУЭ-300. Показана возможность определения профиля гауссова потока электронов в плоскости объекта, а так же выполнения начальной юстировки пучка и контроля его положения в процессе облучения. Высказываются соображения о возможности использования камеры в системе автоматизированного контроля поглощенной дозы на стенде.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: линейный ускоритель, ионизационная камера, электронный пучок, ускоряющий потенциал, ламельный датчик.

IONIZATION CHAMBER DIAGNOSTICS OF ELECTRON BEAM PARAMETERS IN RADIOTECHNOLOGIES

S.P. Gokov, O.A. Demeshko, V.I. Kasilov, S.S. Kochetov, L.A. Makhnenko, I.V. Mel'nitsky, O.A. Shopen

National science center "Kharkov institute of physics and technology"

61108 Kharkov, Academician 1 str., Ukraine

The paper deals with the characteristics of a parallel-plate ionization chamber used as a sensor of the system of electron beam diagnostics at the radiation test bench of the electron linear accelerator LINAC-300. Possibilities are demonstrated for determining the Gaussian electron flux profile in the plane of the object, as well as for performing the initial beam adjustment and beam position monitoring in the process of irradiation. Considerations are given on the possibility of using the chamber in the automated dose-monitoring system at the test bench.

KEY WORDS: linear accelerator, ionization chamber, electron beam, accelerating potential, lamellar sensor.

ДІАГНОСТИКА ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ЗА ДОПОМОГОЮ ІОНІЗАЦІЙНОЇ КАМЕРИ

С.П. Гоков, О.О. Демешко, В.І. Касілов, С.С. Кочетов, Л.О. Махненко, І.В. Мельницький, О.А. Шопен

Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут"

61108, Харків, вул. Академічна 1, Україна

У роботі приведені результати дослідження характеристик плоскопаралельної іонізаційної камери, яка використовується як датчик системи діагностики електронного пучка на радіаційному стенді лінійного прискорювача електронів ЛПЕ--300. Показано можливість визначення профілю гаусова потоку електронів у площині об'єкта, а так само виконання початкової юстировки пучка і контролю його положення в процесі опромінення. Висловлюються розуміння про можливість використання камери в системі автоматизованого контролю поглиненої дози на стенді.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: лінійний прискорювач, іонізаційна камера, електронний пучок, потенціал, що прискорює, ламельний датчик.

Высокие требования, предъявляемые в ряде случаев к точности определения дозы по всему объему облучаемых объектов ($\pm 20\%$) требуют повышения точности установки и контроля положения пучка на объекте в процессе радиационной обработки. Характерным примером может служить облучение хирургической рассасываемой нити (кетгута), когда нужно строго выдерживать заданные дозовые условия ($\sim 1,8$ Мрад), при которых обеспечивалась бы качественная стерилизация нити, и при этом существенно не снижалась механическая прочность (не более 30%).

Обычно кетгут поступает на обработку в стеклянных ампулах $\varnothing \approx 10$ мм, толщиной стенки 0,5 мм, длиной ~ 105 мм, заполненных спиртовым раствором на высоту моточка нити $35 \div 50$ мм и упакованных вертикально по 3-4 ряда в картонных коробках. Подобная упаковка представляет собой многокомпонентный, неоднородный по высоте (плотность $\rho_1 \sim 1,1$ г/см³ и $\rho_2 \sim 0,4$ г/см³) и сложный для обработки объект. Однако, как было показано ранее [1], в случае гауссова пучка в режиме двухстороннего облучения можно заметно оптимизировать процесс обработки, сосредотачивая приосевую часть потока электронов на нижней наиболее плотной части объектов. Тогда при среднеквадратичном радиусе пучка в плоскости передней стенки объекта $\sigma \sim 6,5$ см необходимая точность установки центра заряда пучка должна составлять не более $\pm 0,2$ см.

Цель работы: исследовать работу разработанной ионизационной камеры в разных режимах и установить возможность ее применения в системе автоматизированного контроля поглощенной дозы на радиационном стенде.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

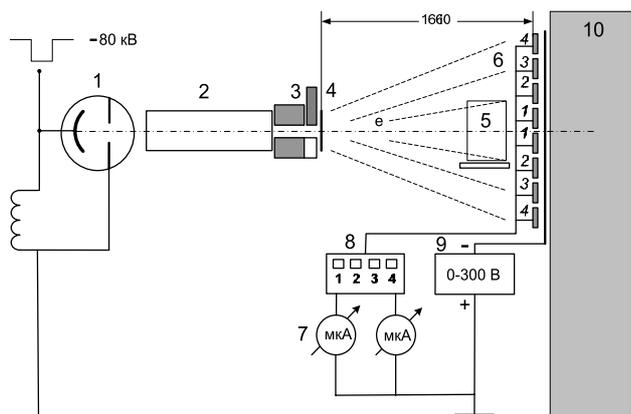


Рис.1. Схема радиационного стенда

1 – источник электронов; 2 – волноводный ускоряющий тракт; 3 – цилиндр Фарадея полного поглощения; 4 – выходное окно ускорителя; 5 – конвейер с облучаемыми объектами; 6 – ионизационная камера; 7 – микроамперметр Ф-195; 8 – коммутатор пластин (ламелей); 9 – регулируемый источник питания постоянного тока 0÷300 В; 10 – стена бункера ускорителя (отражатель).

так как в этой методике производится измерение не самого пучка, а наведенной активности, при этом задействуются специальный стенд и пневмопочта.

В настоящей работе представлены основные характеристики разработанной плоскопараллельной ионизационной камеры специальной конструкции для диагностики пучка на ускорителе, позволяющей не только избавиться от указанных выше недостатков, но и реализовать дополнительные функциональные возможности системы (измерение малых токов, оперативное определение профиля пучка и положения его центра).

Схема установки представлена на рис.1. Рабочие параметры пучка ускорителя: средняя энергия электронов ≤ 16 МэВ, энергетический разброс пучка 10%, длительность импульса тока $1,7 \cdot 10^{-6}$ с, частота посылок $1 \div 100$ Гц, средний ток пучка ≤ 100 мкА.

Камера установлена за конвейером с объектами на защитной стене бункера, являющейся при этом своеобразным естественным отражателем электронов, что позволяет значительно увеличить чувствительность всей установки (так как число отраженных электронов пропорционально интенсивности первичного пучка). Передняя стенка камеры состоит из 8-и изолированных друг от друга и от окружающих заземленных элементов установки дюралюминиевых пластин с размерами $3 \times 70 \times 800$ мм. Изоляция осуществляется при помощи двух пластин из бакелита, толщиной 15 мм закрепленных на задней стенке камеры. Задняя, изолированная от земли, стенка камеры представляет собой сплошной дюралюминиевый лист толщиной 0,8 мм. Пластины с зазорами $\sim 1,5$ мм располагаются горизонтально, по направлению перемещения конвейера. Конструкция камеры позволяет осуществлять вертикальное перемещение (до 40 мм), что дает возможность фиксировать оптимальное положение пучка, геометрическая ось которого устанавливается по зазору между центральными пластинами. Подобная процедура выполняется каждый раз при настройке стенда в заданном режиме для каждой партии облучаемых, одинаковых по высоте и объемному распределению плотности, объектов.

Схема соединения элементов ионизационной камеры показана на том же рисунке. Пластины верхней и нижней половины камеры через коммутатор при помощи проводов сечением $0,5 \text{ мм}^2$ соединяются с двумя одинаковыми измерителями тока. При этом соединения с соответствующим прибором можно делать по одной, симметрично расположенной относительно центрального зазора пластине, либо по нескольким пластинам в различной их комбинации (1-2, 2-3, 1-2-3, 1-2-3-4, 1-3, 2-4), что необходимо для определения плотности тока пучка по вертикали в плоскости камеры. Потенциал отрицательной полярности от источника подается на заднюю стенку камеры.

Таким образом, мы имеем два контура. При этом в цепи измерительных приборов течет часть тока электронного пучка, поглощенного в материале пластин J_{nl} , и ток несвязанных электронов и ионов, образовавшихся в объеме ионизационной камеры J_{op} и J_{diff} .

Не ставя перед собой довольно сложную задачу строгого теоретического описания и количественных оценок всех физических процессов, происходящих в объеме камеры, представим выражение функциональной зависимости суммарного тока от параметров пучка и конструктивных элементов камеры в общем виде:

$$J_{\kappa} \sim J_{nl}(n_0, E_0, \alpha, \rho, t, S) + J_{diff}[n, \varepsilon(E_i), S] + J_{op}[n, \varepsilon(E_i), S, d, U], \quad (1)$$

где n_0 – плотность падающего потока электронов, E_0 – энергия электронов, α – угол падения, ρ –

плотность вещества пластин, t – толщина пластин, S – площадь пластин, d – расстояние между стенками, n – усредненная плотность заряженных частиц в объеме камеры, $\mathcal{E}(E_i)$ – удельная ионизация электронами для воздуха, как функция его энергии (равна $40 \div 500$ парам ионов на 1 см пути); U – разность потенциалов.

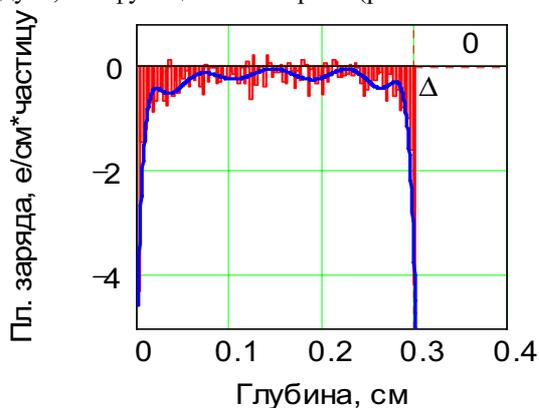


Рис.2. Распределение удельной плотности заряда по глубине пластин, $\eta_A = -0,115$

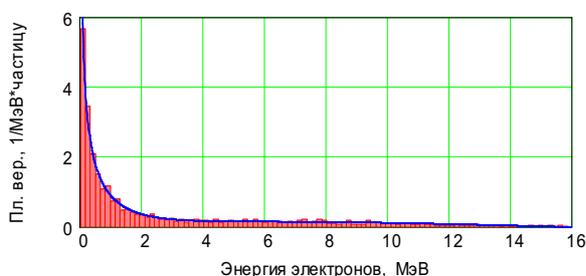


Рис.3. Энергетическое распределение обратно рассеянных электронов, $\eta_B = 0,046$

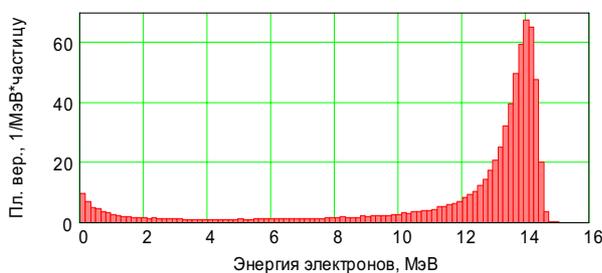


Рис.4. Энергетическое распределение прошедших электронов, $\eta_T = 1,069$

цилиндра Фарадея (3) в предположении гауссова распределения плотности потока электронов. При среднеквадратичном радиусе пучка по вертикали в сечении расположения камеры $\sigma = 9,5$ см имеет место прямая зависимость $J_2 = 0,5243 \cdot J_0$.

Как следует из приведенных данных, при изменении напряжения U в диапазоне $0 \div 300$ В наблюдается существенное нарастание тока (до 200 раз), обусловленного как электронной так и ионной компонентой и просматривается тенденция насыщения камеры. Вместе с тем, зависимость тока камеры J_{2e} от тока пучка на пластинах J_2 для разных значений напряжений U в этом диапазоне, как видно из рис.5. б), является практически линейной. Максимальная величина отношения этих токов, представляющая относительную чувствительность камеры, $k = J_{2k} / J_2$, $k \approx 2,7$ (при $U = 300$ В).

Экспериментально было установлено, что в силу импульсного режима работы ускорителя ток камеры можно несколько увеличить за счет увеличения емкости системы вследствие сглаживания токовых пульсаций. Так, при подключении дополнительного конденсатора $2,5 \cdot 10^5$ пФ параллельно электродам ток возрастает примерно на 40% (собственная емкость камеры составляет $\sim 330,6$ пФ).

Более детально нами рассмотрена задача определения части электронного потока, поглощенного пластинами. Выполнено математическое моделирование методом Монте-Карло с помощью пакета программ PENELOPE 2001 [3]^{1*} прохождения электронного потока с энергией $E_0 = 16$ МэВ, падающего под углом $\alpha = 55^\circ$ через пластины толщиной $t = 3$ мм. На рис.2 представлено распределение удельной плотности заряда по глубине пластины, на рис. 3, 4 соответственно представлены плотности вероятности энергетического распределения отраженных и прошедших электронов. Как следует из этих рисунков (интеграл по зависимости представляет относительные доли электронов) 4,6 % падающего потока электронов рассеивается обратно, ($-11,5\%$) поглощается в материале пластин, что определяет величину тока $J_{пл}$, и 106,9 %, включая вторичные электроны, вылетает за их пределы в объеме камеры. Видно, что при этом выполняется правило сохранения общего количества электронов [4], т.е. сумма коэффициентов обратного рассеивания, поглощения, передачи и вторичной электронной эмиссии равна единице ($\eta_B + \eta_A + \eta_T = 1$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим некоторые экспериментальные данные, демонстрирующие особенности работы ионизационной камеры в различных режимах.

Режим ионизационной камеры

На рис.5а приведены вольтамперные характеристики ионизационной камеры, измеренные при средней спектральной энергии падающих электронов 16 МэВ на двух центральных пластинах, предварительно установленных по пучку симметрично и соединенных параллельно между собой. Указанные на рисунке в качестве параметров кривых величины тока пучка на спаренных пластинах определены расчетным путем по данным измерения полного тока J_0 с помощью

¹ *Расчеты с использованием пакета программ PENELOPE 2001 выполнены В.И.Никифоровым

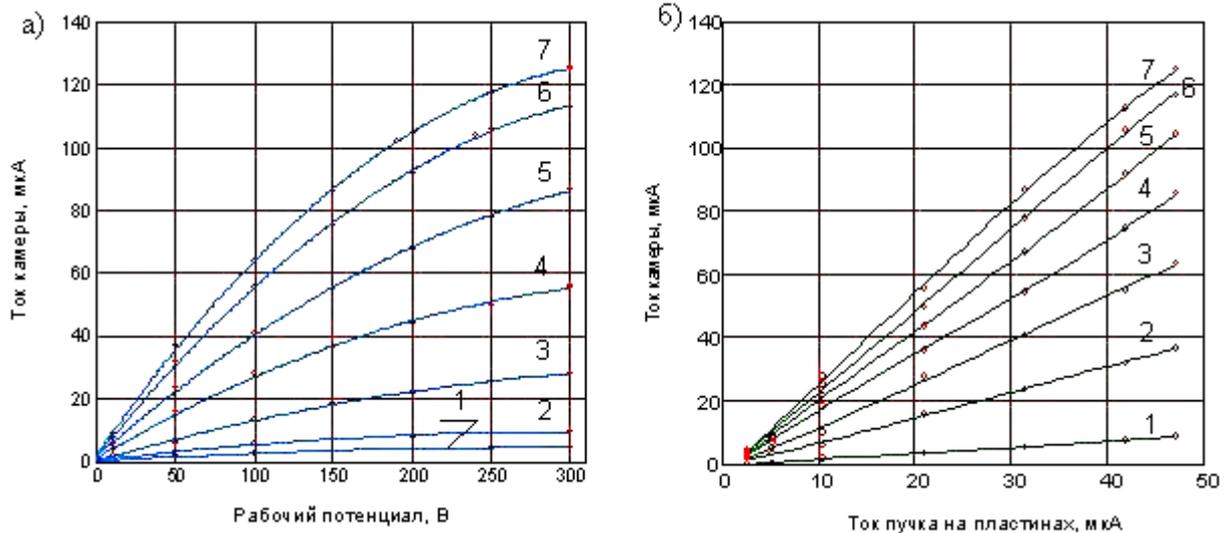


Рис.5. Вольтамперная характеристика ионизационной камеры при энергии электронов 16 МэВ

а) Зависимость тока камеры от рабочего потенциала при разных токах пучка J_2 : 1 – 2,6; 2 – 5,2; 3 – 10,5; 4 – 21,0; 5 – 31,5; 6 – 42,0 и 7 – 47,2 мкА. б) Зависимость тока камеры J_{2k} от тока пучка J_2 при различных величинах потенциала на задней стенке U : 1 – 10; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 150; 5 – 200; 6 – 250 и 7 – 300 В.

Заметим, что при многократных измерениях в одинаковых режимах наблюдается разброс величин от сеанса к сеансу в пределах 10%, что можно объяснить изменениями состояния газовой среды в объеме камеры – температуры, давления, влажности, активно влияющими на ионизационные и рекомбинационные процессы.

Из результатов измерений следует, что даже при максимальном токе пучка 47,2 мкА на пластинах и нулевом потенциале (т.е. при заземленной задней стенке) суммарный ток, протекающий через измерительный прибор, составляет всего 1,2 мкА ($k \approx 0,025$ - коэффициент усиления ламельного датчика).

Режим ламельного датчика

Если заднюю стенку камеры изолировать от земли, т.е. преобразовать ее в обычный ламельный датчик, за счет перераспределения заряда в камере наблюдается многократное увеличение тока в цепи измерительного прибора, что, судя по выражению (1), можно объяснить в основном за счет диффузной компоненты.

Этот режим характеризуется отсутствием ускоряющего потенциала на задней стенке камеры. При этом основную роль в работе датчика играют несвязанные электроны, образующиеся в объеме камеры вследствие процессов вторичной электронной эмиссии, ионизации газа и отражения от стены бункера. Рассмотрим следующий механизм процессов ионизации в этом случае.

На рис.6 представлено сечение камеры в горизонтальной плоскости. Как показано на рис.6, часть падающего под углом $\alpha = 55^\circ$ электронного потока, пройдя пластины и камеру с потерей энергии ~ 2 МэВ, обратно рассеивается на бетонной стене и вновь возвращается в рабочий объем камеры. По оценкам это составляет $\sim 9,5\%$.

Рис.6. Элемент камеры (вид сверху)
1 – внешний экран; 2 – пластина передней стенки камеры; 3 – внутренний экран; 4 – задняя стенка камеры; 5 – бетонная стена бункера ускорителя (отражатель)

Поскольку отраженные электроны имеют широкий и непрерывный спектр, с крутым подъемом в низкоэнергетичной области (≤ 2 МэВ), то в камере обеспечиваются более благоприятные условия для развития ионизационных процессов. Причем, как за счет увеличения суммарной плотности частиц, так и в силу возрастающего вклада электронов малых энергий, для которых существенно больше удельная ионизация. Кроме того, отраженные электроны с энергиями менее 4 МэВ, которые составляют основную часть спектра, в принципе не могут преодолеть 3-х мм алюминиевый барьер и вылететь за пределы камеры.

Из всего сказанного следует, что условия для ионизации с внешней стороны пластин и внутри камеры должны заметно отличаться. С целью уточнения этих предположений был выполнен соответствующий эксперимент.

Две центральные пластины камеры (1- низ и 1- верх) были с внешней и внутренней стороны отдельно закрыты изолированными экранами из алюминиевой фольги толщиной 0,01 мм (см. рис.6) и далее проведены измерения токов, стекающих с обоих экранов (диффузных), поглощенного тока с пластин, а также суммарного тока со всей сборки. При измерениях свободные элементы сборки заземлялись. Результаты измерений, прове-

денных при среднем токе пучка $J_0 = 97$ мкА, представлены в таблице. Для сравнения в скобках приведены расчетные значения поглощенного тока.

Таблица

Результаты измерений, проведенных при полном токе пучка		
Элементы сборки	Верхняя сборка, ток мкА	Нижняя сборка, ток мкА
1. Внутренний экран	23	23
2. Пластина	-1,6 (-2,46)	-1,6 (-2,46)
3. Внешний экран	5	5
4. Параллельное соед.	27	27

Из таблицы следует, что 5-и кратное различие экранных токов подтверждает предположение о вкладе низкоэнергетических электронов вблизи внутренних поверхностей пластин. Различие между экспериментальной и расчетной величинами поглощенного тока, определяется нарушением электронного баланса за счет отраженного от бетона потока электронов, падающего на внутреннюю поверхность пластин, что не учитывается в этом расчете.

В режиме ламельного датчика, при полном токе пучка 90 мкА суммарный ток, снимаемый со всех 8-и пластин, соединенных параллельно, составляет 40 ± 60 мкА. Как показывает опыт, этого в большинстве случаев оказывается достаточно для выполнения операций по установке и контролю положения пучка на объектах в процессе облучения.

На рис.7 приведены экспериментальные данные, демонстрирующие возможность использования 8-и пластиночной ионизационной камеры в качестве прибора для определения распределения плотности тока пучка в поперечном сечении. Измеренные точки соединены сплайновыми кривыми. Штриховыми линиями показаны подогнанные по средним значениям гауссовы кривые.

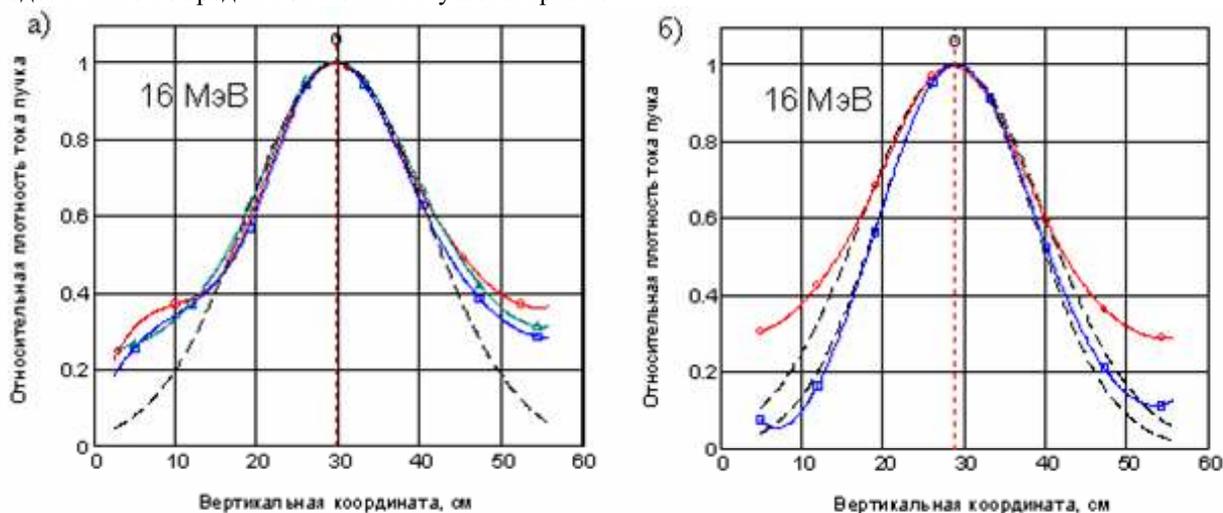


Рис.7. Относительная плотность тока пучка по вертикали.

- а) Данные измерений при разной величине полного тока: кружочки – 20 мкА; квадратики – 40 мкА и треугольники – 80 мкА. б) Данные измерений при разном потенциале: кружочки – 300 В; квадратики – 0 В.

Как следует из анализа данных, приведенных на рис.7а), распределение плотности тока практически не зависит от его величины (измерения проводились при потенциале 300 В). Среднеквадратичный радиус пучка σ (полуширина гаусса на уровне $\sim 0,6$) при измерении составил 11 см. Вместе с тем, из рис.7,б) следует, что рабочий потенциал камеры заметно влияет на точность измерения поперечного профиля пучка электронов: при $E=300$ В, $\sigma = 11,2$ см, а при $E=0$ $\sigma = 9,5$ см. Это объясняется тем, что на пластинах, имеющих толщину 3 мм, происходит довольно существенное рассеяние пучка, а при увеличении рабочего потенциала собирание электронов происходит с большего объема камеры. Более значительное расхождение расчетных и экспериментальных кривых, наблюдаемое на уровне ниже 0,6 от максимума, можно объяснить, по-видимому, кроме сказанного, относительным возрастанием к периферии камеры низкоэнергетической компоненты пучка и соответствующим увеличением удельной ионизации газа в этой области.

Результаты определения среднеквадратичного радиуса пучка с помощью камеры достаточно хорошо согласуются с данными, полученными при измерении профиля пучка с помощью пленочных дозиметров типа СО ПД(Ф)-5/150, приведенными на рис. 8. Измерения выполнялись при средней энергии пучка 16 МэВ, токе ~ 85 мкА. При этом доза набиралась за 40 проходов конвейера, и ее максимальная величина составляла ~ 8 Мрад. Эти данные демонстрируют, хорошее согласие экспериментальных точек с расчетной гауссовой кривой. Рас-

стояние планки с дозиметрами от выходной фольги ~ 154 см. (Рассчитанная по теории Мольера для этого расстояния при нормальных условиях величина $\sigma = 8,03$ см. Для расстояния 166 см, на котором расположена ионизационная камера, расчетная величина $\sigma = 8,775$ см).

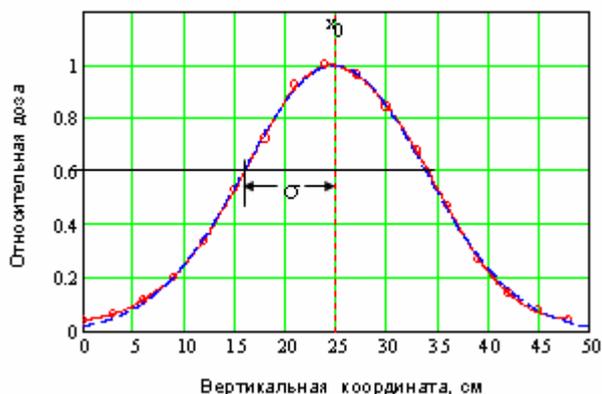


Рис.8. Данные измерения плотности тока пучка по дозе.

Среднеквадратичный радиус пучка $\sigma = 8,9$ см

чувствительность уменьшается примерно в 4 раза.

Увеличение емкости камеры при подключении дополнительного конденсатора $2,5 \cdot 10^5$ пФ параллельно электродам позволяет увеличить регистрируемый ток на 40%.

Использование отражающих свойств бетонной стены на которой установлена камера, а также учет процесса вторичной электронной эмиссии (появление в камере несвязанных электронов) позволяет на 45% увеличить ее чувствительность в обычном камерном режиме и более чем в 2 раза в режиме ламельного датчика.

Для уменьшения искажений при измерении поперечного распределения плотности тока пучка целесообразно уменьшить толщину пластин передней стенки камеры и расстояние между электродами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.С. Балагура, Л.А. Махненко, П.М.Рябка К вопросу о внедрении радиационных технологий на ЛУЭ-300 // ВАНТ.-Серия: Ядерно-физические исследования (33).-1999.- № 1.- С.52-53.
2. Н.И. Айзацкий, В.И. Кулибаба, Н.И. Маслов, В.А. Мац, В.Д. Овчинник, Б.И. Шраменко Система для измерения профиля пучка гамма-квантов и электронов по распределению поверхностной β - активности // Тезисы докладов VII конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. Харьков.- 2009.- С. 97-98.
3. F. Salvat, J.M. Fernández-Varea and J. Sempau PENELOPE - A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport // OECD Nuclear Energy Agency.- Workshop Proceedings Issy - les-Moulineaux.- France 5-7 November.- 2001.
4. Доклад 35 МКРЕ Радиационная дозиметрия: электронные пучки с энергиями от 1 до 50 МэВ.- М.: Энергоатомиздат, 1988. - С.74-78.

Измерение относительного ослабления плотности потока электронов, проходящего через объекты, позволяет осуществить квазинепрерывный контроль средней плотности вещества объектов, а, следовательно, поглощенной дозы, т.е. получить исходные данные, которые могут быть использованы при автоматизации технологического процесса.

ВЫВОДЫ

Использование ионизационной камеры, установленной за перемещающимися объектами, обеспечивает оперативную диагностику пучка электронов и повышает эффективность технологического процесса.

Камера может применяться в двух возможных вариантах: в обычном рабочем режиме, с приложением напряжения между электродами, или в режиме ламельного датчика. При этом ее аппаратная